

Duvar yönlendirme özelliğine sahip bir yanma odasında yakıt enjeksiyon konum açılarının araştırılması

İlker Temizer

İmalat Mühendisliği / Teknoloji Fakültesi, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Türkiye

(ilktemizer@gmail.com)

(Received: 30 September 2025, Accepted: 13 October 2025)

(3rd International Conference on Pioneer and Innovative Studies ICPIS 2025, October 06-07, 2025)

ATIF/REFERENCE: Temizer, İ. (2025). Duvar yönlendirme özelliğine sahip bir yanma odasında yakıt enjeksiyon konum açılarının araştırılması, *International Journal of Advanced Natural Sciences and Engineering Researches*, 9(10), 132-138.

Özet – Yanma odası içerisinde yakıt ve havanın karışım şekli yanma olayında kimyasal reaksiyonlar için önemli bir etkidir. Bu etkenlerin iyileştirilmesinde asıl amaç; yüksek yanma performansına sahip yeni nesil motorları geliştirerek, kirletici emisyonları kontrol etmektir. Bu çalışmada, yakıt yönlendirme özelliğine sahip bir yanma odasında enjektörün farklı konum açılarına göre dağılım gösteren yakıt spreylerinin motor parametreleri üzerindeki etkileri sayısal olarak incelenmiştir. Ansys Forte yazılımı kullanılarak simule edilen tek silindirli bir motorun, farklı devir sayılarında elde edilen sıcaklık/yakıt püskürtme dağılımları görsel çıktılarla desteklenmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, yakıt yönlendirme özelliğine sahip bir yanma odasında duvar yapısı/püskürtme ekseninde 10°'lik bir açı farkının CO, NO_x ve is emisyonları üzerinde önemli avantajları beraberinde getirdiği tespit edilmiştir. Enjektör nozulundan belirli bir kinetik enerjide oda içerisine püskürtülen yakıt zerreciklerinin, duvar bölgesinde birikmeden farklı lokasyonlara yönelimi, beraberinde daha iyi bir yanmanın oluşmasına neden olmuştur. Yakıt yönlendirme çıkıntılarında sahip bir oda içerisinde, iki farklı oyuğa gerçekleştirilebilen eşit dağılımla daha dengeli bir yanma söz konusu olabilir. Yakıtın oda içerisindeki dağılım etkinliğinin artışına bağlı olarak, is emisyonlarında önemli azalmaların sağlanması, aynı zamanda yerel sıcaklıkların azaltılarak daha homojen bir sıcaklık artışı ile NO_x emisyonlarının kontrol altına alınabileceği belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler – Duvar yönlendirmeli yanma odası, yakıt sprey, dizel motor, yanma

I. GİRİŞ

Son yıllarda özellikle dizel motorları için tasarlanmış farklı yanma odası modellerine sıklıkla rastlanılmaktadır. Ancak üzerinde çalışılan birçok geometrik modelde olduğu gibi, yanmanın iyileşmesine bağlı olarak artan silindir içi basınç ve sıcaklık değerlerinin NO_x emisyonlarını önemli derecelerde arttırdığı ve bunun da egzoz sınırlamaları nedeniyle çoğunlukla akademik boyutta kaldığı tespit edilmiştir. NO_x emisyonlarında yaşanan bu artışların SCR, EGR sistemleri gibi ek maliyet ve donanımlarla kontrol altında tutulabileceği belirtilmektedir [1,2]. Özellikle dizel motorlarında performans ve emisyonları üzerinde yapılan birçok çalışmada piston çanak geometrisinin modifikasyonu ve sıkıştırma oranının dizel bir motorun performans ve emisyonları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle düz duvar yapılarına kıyasla, kavisli bir geometrik yapıya sahip yanma odalarında yakıtın oda içerisindeki dağılımını incelemektedir [3-6]. Bu değişim beraberinde yanma parametrelerini doğrudan etkilemektedir. Nitekim Şener vd. [7] tarafından gerçekleştirilen çalışmada farklı uzunluk-çap, duvar mesafesi gibi değişkenler altındaki piston çanak geometrileri ile motordaki ısı salınım hızı, silindir içi basınç, silindir içi sıcaklık ve

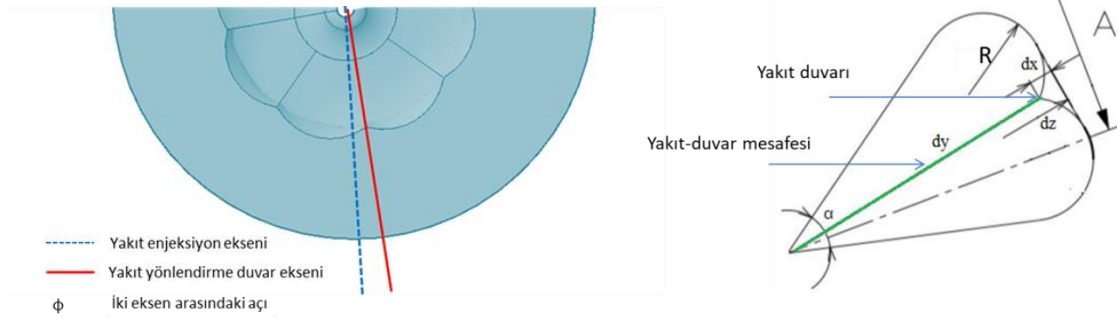
emisyon değerleri üzerinde önemli bulgular elde edilmiştir. Bu noktada dizel motorlarında yanmanın kontrol edilebilmesi beraberinde birçok faydayı getirebilir. Nitekim optimize edilmiş yeni piston çanak tasarımı ile kontrollü yanmayı artırarak gelişmiş yakıt verimliliği sağlamak ve bunun yanında düşük NO ve is emisyonlarını oluşturmak mümkündür. Aynı zamanda homojen bir yanma ile yanma ağırlık merkezinin optimuma çekilmesi sonucu alev sönme bölgesinin azaltılarak HC emisyonlarının minimize edilmesi önemlidir. Li vd. [8], biodizel ile çalışan dizel bir motorda yanma odası geometrisinin yanma ve emisyon karakteristikleri üzerindeki etkisi sayısal olarak araştırılmıştır. Yarım küre yanma odası, sıg derinlikli yanma odası ve temel omega yanma odası olmak üzere üç farklı yanma odasını KIVA-4 yazılımı ile modellenmiştir. Özellikle düşük motor hız koşullarında sıg derinlikli yanma odasının diğer iki çanak tasarımına kıyasla, nispeten daha yüksek NO değerlerine ve benzer şekilde, omega yanma odası geometrisinin ise yüksek motor devri koşullarında daha yüksek NO emisyonuna neden olabileceği görülmüştür. Piston çanağı geometrisi, yanma, akış, türbülans ve silindir içinde karışım oluşumu gibi birçok parametreyi doğrudan etkiler. Bu durum motor performansında, yanma karakteristiklerinde ve egzoz emisyonlarında değişikliğe neden olur. Temizer ve Cihan [9], tarafından gerçekleştirilen çalışmada oyuklu yapıya sahip piston taban-yan duvar yarıçapının karışım oluşumunu önemli ölçüde etkilediği belirtilmiştir. Mishra vd.[10] tarafından yapılan bir başka çalışmada, homojen dolgulu sıkıştırma ateşlemeli motor karakteristiklerini geliştirmek için, çok kademeli enjeksiyonla birleştirilmiş bir yarım küre (HCC) ve toroidal (TCC) piston yanma odası geometrisi ve düz piston yanma odası geometrisi karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, toroidal şekilli piston geometrisinin geleneksel piston geometrisine kıyasla termal verimliliği %3-5 oranında artırdığı görülmüştür. Literatürde, farklı yanma odaları, yakıt türleri, püskürtme stratejileri gibi birçok yöntemin kullanıldığı deneysel ve sayısal çalışma görülmektedir. Yanal girdaplı yanma sistemin, geleneksel u-tipi adı verilen yanma sistemine dayandırılarak yeniden geliştirildiği tasarımda, yakıt tüketiminin ve is emisyonlarının artan püskürtme geliş açısıyla azaldığı belirtilmiştir. Püskürtme geliş açısı maksimuma ulaştığında, yanma performansının arttığı belirlenmiştir [11]. Babu vd.[12], ANSYS Fluent yazılımını kullanarak bir dizel motorda modifiye edilmiş Yarım Küresel Yanma Odası (MHCC) ve geleneksel Yarım Küresel Yanma Odası (HCC) tasarımlarını karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre pistonun farklı pozisyonlarındaki akış hareketleri incelendiğinde, HCC'ye kıyasla karışım oluşumunun daha iyi olduğu görülmüştür. Saito vd.[13] tarafından, tek silindirli, dört zamanlı, doğrudan enjeksiyonlu bir dizel motorda standart ve girintili yanma odası geometrilerini karşılaştırmışlardır. Motor performansı, NO ve is emisyonları ve yanma parametreleri araştırılmış ve sonuç olarak, girintili geometride yakıtın çarptığı duvar daha sıcak olması nedeniyle tutuşma gecikmesinin azaldığı, türbülans silindir içi hava hareketlerinin artmasıyla ile yanmanın iyileştiği vurgulanmıştır. Son dönemlerde üzerinde çalışan yanal girdaplı yanma sistemlerinin, dizel motorlarda yakıt tüketimi ve is emisyonunu önemli ölçüde etkilediği bilinmektedir [14,15]. Silindir içindeki havanın kullanımını iyileştirmek, termal yükü azaltmak ve dizel motorların emisyon performansını iyileştirmek amacıyla yapılan bir başka çalışmada yeni bir yanal girdaplı yanma sistemi (LSCS) önerilmiştir. LSCS'nin çeşitli hava oranlarında deneysel araştırması, tek silindirli doğrudan enjeksiyonlu bir motor kullanılarak yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda, LSCS'nin çift girdaplı yanma sistemine (DSCS) kıyasla daha düşük yakıt tüketim ve daha düşük is emisyonları elde edilmiştir [16]. Kutlar vd. [17] farklı yanma odası geometrilerinin türbülanslı yanma hızlarına etkisini deneysel ve teorik olarak incelemişlerdir. Buji ateşlemeli bir motor için üç bölge, yarı boyutlu bir termodinamik model oluşturulmuş, ölçülen silindir basınç verileri, modelin bölgeleri arasındaki geçişi kurmak ve türbülanslı yanma hızlarını belirlemek için kullanılmıştır. Modelde iki farklı türbülans hızı hesaplanmış olup, bunlar alev yayılma ve tüketim hızlarıdır. Yanma odası geometrisinin türbülanslı yanma hızlarını önemli ölçüde etkilediği gözlenmiştir. Bir başka çalışmada Li vd. [18] yanma odası duvarı etrafındaki yakıt dağılımının, motor performansını etkileyen önemli bir parametre olduğunu ve aynı zamanda yönlendirme etkisi olmadan difüzyon zorluklarının yanmayı olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir.

Farklı yanma odası türleri çeşitli alternatif yakıtların daha yaygın kullanımlarına imkân sağlayabilir. Yanma odası geometrisinin ve farklı oranlarda biyodizel kullanımının motor performans ve emisyonları üzerindeki incelendiği çalışmada Wang vd.[19], optimize edilmiş bir yanma odası ile daha yüksek termal verim, daha düşük özgül yakıt tüketiminin ve aynı zamanda daha düşük is ve CO emisyonları sağlanabileceği göstermiştir. Khan vd. [20] tarafından yapılan çalışmada, soya metil esteri ve farklı piston

yanma odası geometrilerinin tek silindirik dizel motorlarda performans, yanma ve emisyonlara etkisi HAD simülasyonlarıyla araştırılmış olup, modifiye edilmiş bir yanma odasında daha iyi hava hareketi ve karışım sayesinde performans ve yanmanın iyileştiği belirtilmiştir. Ayrıca yakıt türleri içerisinde hidrojenin farklı yanma odaları içerisindeki performansının incelendiği bir başka çalışmada ise toroidal geometri adı verilen yanma odasının, hidrojenle birlikte kullanımı ile verimli yanma koşullarının gerçekleştiği belirtilmiştir. Bu durum yeni yanma odaları ile alternatif yakıt türlerinin arasındaki optimizasyonun ileriki çalışmalarda daha yaygın bir şekilde uygulanabileceğini göstermektedir [21]. Yanma odası şekli ve çanak derinliği, dizel motorlarda hava-yakıt karışımı, yanma süreci ve emisyonlar üzerindeki etkisi büyüktür [22,23].

II. MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada kullanılan yanma odasının duvar/oyuk yapısı, silindir içerisindeki akışı yönlendirebilme özelliğine göre belirlenmiş 8 adet oyuktan oluşmaktadır. Yakıt püskürtme eksenine yerleştirilen kavisli bu duvar yapısı ile yakıt demetinin birden fazla bölgeye dağılımı incelemektir. Bütün bu iyileştirmelerde yakıt, hava ve sonrasında gelişen alevin oda içerisindeki homojen dağılımı da hedeflenmektedir. ANSYS Forte yazılımı HAD uygulamalarında temel yönetici denklemler olarak akışkanlar dinamiğinin süreklilik, momentum ve enerji denklemleri kullanılmıştır. Aynı zamanda, analizlerde sıkıştırma oranı 17,5 olarak belirlenmiştir. Oda içerisindeki radyal hava hareketliliği düşünüldüğünde, yakıt yönlendirme çıkıntıları ile enjektör nozul eksenini arasında ideal bir açının belirlenmesi gerekmektedir. Bu çıkıntıların önemi, yakıtı iki oyuğa homojen dağıtma özelliğine göre belirlenmektedir. Bu açı değeri farklı devir sayıları da göz önünde bulundurularak, tekrarlı sayısal analiz sonuçlarına göre $7,5^\circ$ 10° ve $12,5^\circ$ olarak denenmiştir. Direkt enjeksiyon şartlarında, başlangıç hava sıcaklığı 380 K, basınç değeri 1,095 bar ve piston tepesindeki sıcaklık ise 575 K olarak girilmiştir. Şekil 1, yanma odası içerisindeki püskürtme doğrultu eksenini ve duvar eksenini göstermektedir.



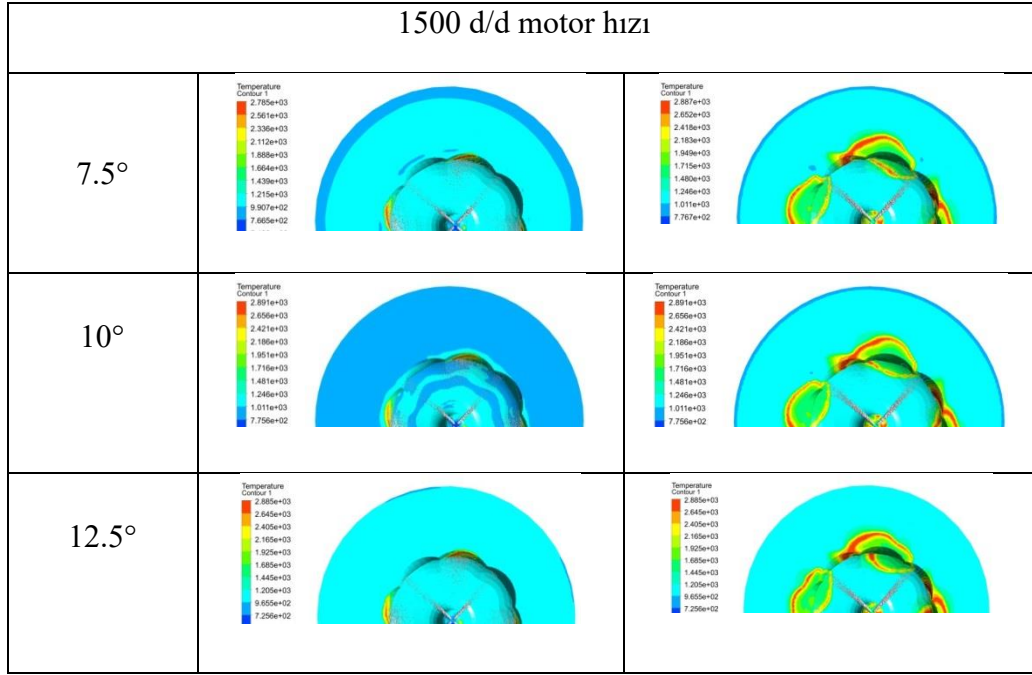
Şekil 1. Akış ve alev yönlendirme özelliğine sahip pistonda yakıt-duvar ilişkisi (a)

Damlacık çarpışması için “Adaptive Collision Mesh” modeli kullanılmıştır. Bu modelin en büyük avantajlarından biri ağ yapısına bağımlılığı ortadan kaldırmasıdır. Damlacıkların parçalanması için Gas-Jet alt modelinin de dahil edildiği KH-RT hibrit modeli kullanılmaktadır. Çalışmalarda alt modeller olarak; motor çalışmalarına uygunluğundan dolayı RNG k-epsilon türbülans modeli kullanılmıştır. Bu model genel motor modeli için yeterli gerçeklikte makro boyutta inceleme imkânı sunmakta ve çözüm süresi açısından diğer modellere göre avantaj sağlamaktadır.

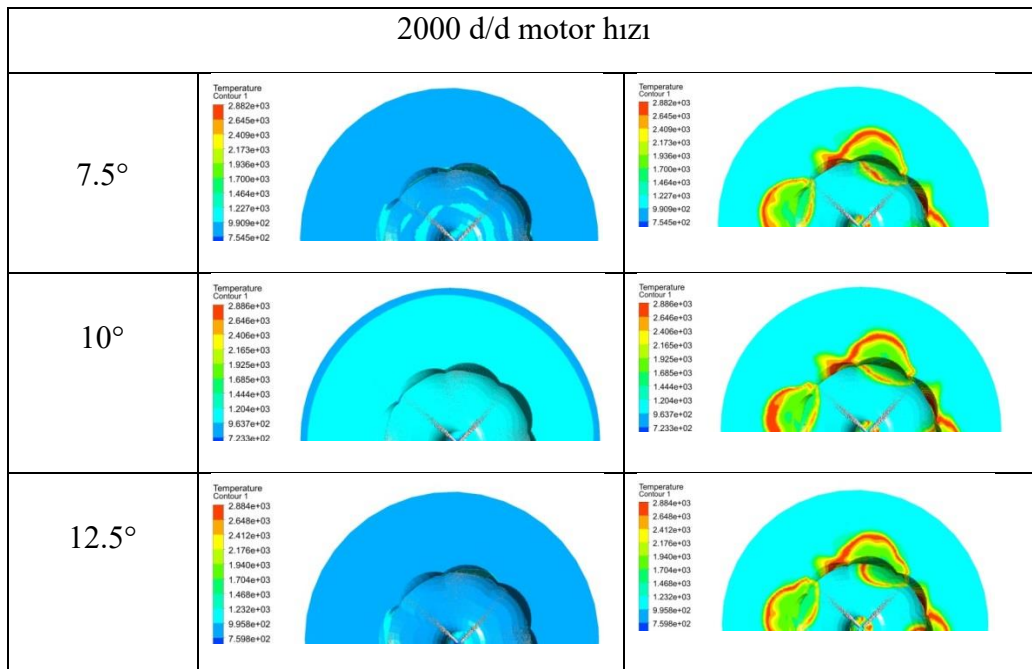
III. BULGULAR

Ansyst Forte yazılımında gerçekleştirilen yanma analizlerinde farklı motor hızlarında yanma odasına yapılan yakıt enjeksiyonuna ait sıcaklık/püskürtme dağılımları ilk olarak incelenmiştir. Pistonun ÜÖN (720° KMA) ve sonrasında (725° KMA) ait çıktılarda, yakıt demetinin gelişimi ve dağılımı üzerine durulmuştur. Duvar yönlendirmeli yanma odalarında temel amaç, yanmanın iyileşmesine katkı sağlayacak silindir içi akış hareketliliğinin ve homojenliğinin sağlanması hususudur. Bu doğrultuda farklı

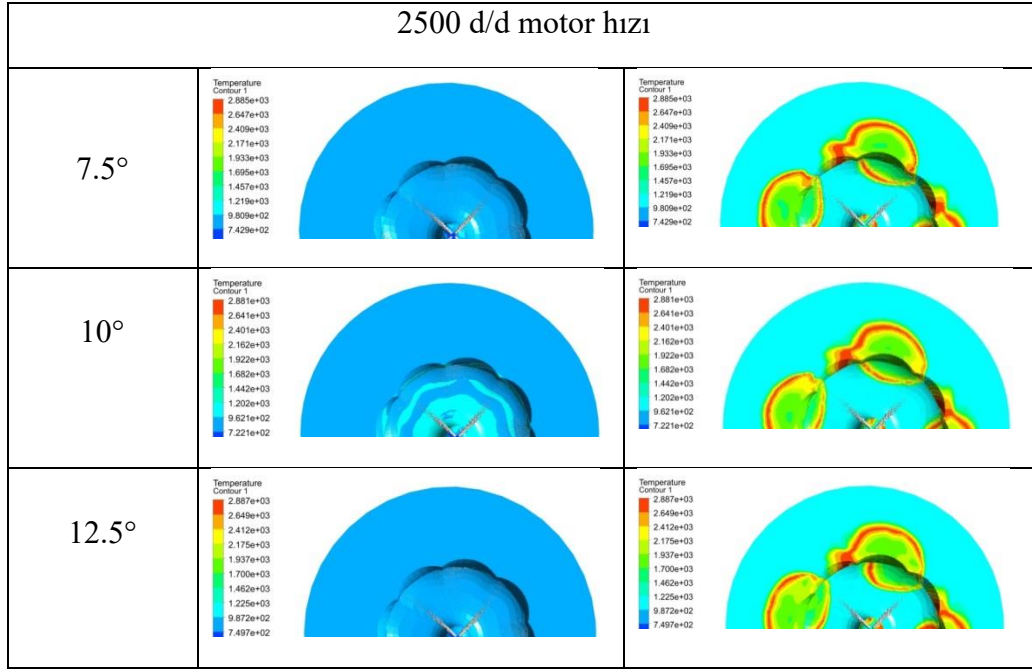
motor hızlarıyla oluşan silindir içi swirl hareketliliği, yakıtın oda içerisindeki dağılımını önemli derecede etkilediği bilinir. Bunun yanında yanma ve sonrasında gelişen alev dalgalarının da dağılımı bu husustan etkilenmektedir. Yakıt demetinin oda içerisindeki ilerleyişi ile birlikte daha küçük zerrelere ulaşması, havanın yakıt dağılımı üzerindeki etkisini daha da artırır. Düz duvar yapısına sahip motorlarda, yakıtın cidara çarpmasıyla birlikte sahip olduğu enerjinin burada sönümlenmesine ve sonrasında oluşan lokal yakıt birikintileri, kalitesiz bir yanmaya ve yanmamış ürünlerin artmasına neden olabilmektedir. Bu nedenle oda içerisinde duvar yönlendirme özelliği ile yakıtın homojen dağılımının gerçekleşmesi, uygun püskürtme açılarıyla mümkündür. Şekil 1, Şekil 2 ve Şekil 3 farklı motor hız ve açı değerlerinde oluşan oda içerisindeki sıcaklık/püskürtme dağılımlarını göstermektedir. Oda içerisindeki sıcaklık dağılımları izlendiğinde, bütün çalışmalarda homojen bir alev dağılımının gerçekleştiği söylenebilir.



Şekil 2. 1500 d/d şartlarında oda içerisindeki 720° KMA (sol) ve 725° KMA (sağ) için sıcaklık/yakıt dağılımları



Şekil 3. 2000 d/d şartlarında oda içerisindeki 720° KMA (sol) ve 725° KMA (sağ) için sıcaklık/yakıt dağılımları



Şekil 4. 2500 d/d şartlarında oda içerisindeki 720° KMA (sol) ve 725° KMA (sağ) için sıcaklık/yakıt dağılımları

Tablo 1. 1500 d/d çalışma şartlarında oluşan motor ve egzoz parametreleri

		1500 d/d motor hızı için		
		7.5°	10°	12.5°
Maksimum basınç	MPa	6,68	6,64	6,70
Termik verim		0,39733	0,3986	0,399
Maksimum basınç artış oranı	MPa/deg	0,535	0,562	0,540
İs@EVO	[g]	1,8768E-004	1,55475 E-004	1,63447 E-004
NOx	[g]	8,86526E-004	8,78888 E-004	9,01750 E-004
CO	[g]	8,41490E-004	5,93630 E-004	6,98916 E-004

Tablo 2. 2000 d/d çalışma şartlarında oluşan motor ve egzoz parametreleri

		2000 d/d motor hızı için		
		7.5°	10°	12.5°
Maksimum basınç	MPa	6,90	6,88	6,92
Termik verim		0,41	0,41	0,41
Maksimum basınç artış oranı	MPa/deg	0,658	0,71	0,66
İs@EVO	[g]	1,7790E-004	9,88958E-005	1,13060E-004
NOx	[g]	9,00353E-004	8,43000E-004	9,13860E-004
CO	[g]	4,78840E-004	3,80520E-004	4,51158E-004

Tablo 3. 2500 d/d çalışma şartlarında oluşan motor ve egzoz parametreleri

		2500 d/d motor hızı için		
		7.5°	10°	12.5°
Maksimum basınç	MPa	7,05	7,04	7,09
Termik verim		0,42	0,423	0,423
Maksimum basınç artış oranı	MPa/deg	0,86	0,89	0,85
İs@EVO	[g]	6,69448E-005	5,71422E-005	6,78397E-005
NOx	[g]	9,04178E-004	8,71068E-004	9,41840E-004
CO	[g]	2,51931E-004	1,87930E-004	2,78392E-004

Oda içerisindeki yakıt zerrecilerinin dağılımı, yanma performansını ve egzoz oluşumlarını doğrudan etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, bütün devir sayılarında enjektör/duvar açısının 10° olması durumunda yakıt zerrecilerinin oyuk bölgelerine daha homojen ve eşit dağılım gösterdiği ve bununda motor yanma parametrelerine doğrudan yansıdığı görülmüştür. Maksimum basınç ve basınç artış parametreleri üç farklı açı değerlerinde birbirlerine yakın sonuçlar oluştursa da, özellikle is, NOX ve CO emisyonlarında hissedilir bir farkın olduğu görülmüştür. Özellikle CO emisyonları üzerinde 7.5° enjektör konum açısının yüksek sonuçları beraberinde getirdiği, 10 derecelik enjektör konum açısı ile sonuçların daha olumlu geliştiği Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3’de görülmektedir. Silindir içerisindeki swirl oranı olarak tanımlanan boyutsuz terimin farklı motor türleri için değişkenlik göstermesi, enjektör konum açısının da değişmesine neden olabilir. Ancak direkt püskürtme şartlarında tek silindirli bir motor çalışma koşullarında, farklı devir sayıları için optimum açının 10° olduğu tespit edilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Duvar yönlendirmeli bir yanma odasında enjektör konum açısının özellikle egzoz emisyonları üzerinde oldukça etkili olduğu belirlenmiştir. Özellikle farklı oyuklara gerçekleştirilebilen homojen yakıt dağılımının yanma kalitesini doğrudan etkilediği görülmüştür. Bu açı değerinin azalması ya da artmasına bağlı olarak egzoz emisyonlarının önemli ölçüde etkilendiği görüldüğünden, kullanılan motor türlerine göre optimum açı değerinin tekrardan belirlenmesi gerektiği söylenebilir. Teğetsel akış hızının ortalama piston hızına oranı olarak kabul edilen swirl oranının, düşük hızlı bir motorda enjektör/duvar açısı üzerinde optimum bir değerde (10°) olduğu tespit edilmiştir. Bu açı değerinin farklı motor türleri için değişkenlik gösterebileceği öngörülmektedir. Yakıt hava homojenliğinin artmasına bağlı olarak artan maksimum basınç artış oranlarının, yakıt enjeksiyon avans değerlerinde yapılacak değişikliklerle kontrol altına alınması mümkündür. Bu nedenle yeni yapılacak çalışmalarla, değişken püskürtme avansları ile pik basınçların ve sıcaklıklarının önüne bu sayede geçilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Xiangrong, Li., Yanlin, Chen ., Liwang, Su ., Fushui, Liu.2018. Effects of lateral swirl combustion chamber geometries on the combustion and emission characteristics of DI diesel engines and a matching method for the combustion chamber geometry, Fuel, 224, 644-660.
- [2] Jyothi, U. S., Reddy, K. V. K. 2022. HAD analysis on particle diameter in hydrogen-enriched diesel engine for different piston bowl geometries. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1661-1670.
- [3] Yaliwal, V., Gaddigoudar, P., Akki, S., Devadas, V., Jaliha, S. S., Prasad, M. G., Banapurmath, N. R. 2022. Influence of piston bowl geometry on the performance and emission characteristics of a diesel engine operated on single fuel mode using dairy scum oil biodiesel. *Materials Today: Proceedings*, 52, 1223-1227.
- [4] Sener, R., Yangaz, M. U., Gul, M. Z. 2020. Effects of injection strategy and combustion chamber modification on a single-cylinder diesel engine. *Fuel*, 266, 117122.
- [5] Gugulothu, S. K. 2020. Retracted Article: Effect of piston bowl geometry modification and compression ratio on the performance and emission characteristics of DI diesel engine. *SN Applied Sciences*, 2(8), 1399.

- [6] Ganji, P. R., Singh, R. N., Raju, V. R. K., Srinivasa Rao, S. 2018. Design of piston bowl geometry for better combustion in direct-injection compression ignition engine. *Sādhanā*, 43, 1-9.
- [7] Şener, R., Gül, M. Z. 2021. Optimization of the combustion chamber geometry and injection parameters on a light-duty diesel engine for emission minimization using multi-objective genetic algorithm. *Fuel*, 304, 121379.
- [8] Li, J., Yang, W. M., An, H., Maghbouli, A., Chou, S. K. 2014. Effects of piston bowl geometry on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled diesel engines. *Fuel*, 120, 66-73.
- [9] Temizer, İ., Cihan, O. 2023. An experimental investigation of new chamber geometry on the combustion characteristics, performance and emissions in a light-duty diesel engine. *Fuel*, 345, 128160.
- [10] Mishra, A., Kulshrestha, S., Patel, F. M., Tiwari, N., Sharma, A. 2024. Effect of piston bowl geometry and spray angle on engine performance and emissions in HCCI engine using multi-stage injection strategy. *Environmental Progress Sustainable Energy*, 43(2), 14203.
- [11] Chen, Y., Li, X., Li, X., Zhao, W., Liu, F. 2019. The wall-flow-guided and interferential interactions of the lateral swirl combustion system for improving the fuel/air mixing and combustion performance in DI diesel engines. *Energy*, 166, 690-700.
- [12] Bapu, B.R., Saravanakumar, L., Prasad, B.D. 2017. Effects of combustion chamber geometry on combustion characteristics of a DI diesel engine fueled with calophyllum inophyllum methyl ester. *Journal of the Energy institute*, 90(1), 82-100.
- [13] Saito, T., Daisho, Y., Uchida, N., Ikeya, N. 1986. Effects of combustion chamber geometry on diesel combustion. *SAE transactions*, 793-803.
- [14] Li, X., Chen, Y., Su, L., Liu, F. 2018. Effects of lateral swirl combustion chamber geometries on the combustion and emission characteristics of DI diesel engines and a matching method for the combustion chamber geometry. *Fuel*, 224, 644-660.
- [15] Su, L., Li, X., He, X., Liu, F. 2015. Experimental research on the diffusion flame formation and combustion performance of forced swirl combustion system for DI diesel engines. *Energy Conversion and Management*, 106, 826-834.
- [16] Li, X., Zhou, H., Su, L., Chen, Y., Qiao, Z., Liu, F. 2016. Combustion and emission characteristics of a lateral swirl combustion system for DI diesel engines under low excess air ratio conditions. *Fuel*, 184, 672-680.
- [17] Kutlar, A.O., Doğan, H.E., Demirci, A., H., Arslan, H. 2023. An investigation of the impact of combustion chamber geometry on turbulent burning speeds in a thermodynamic model. *Journal of Energy Resources Technology*, 145(6), 062304.
- [18] Li, J., Yang, W.M., Zhou, D.Z. 2017. Modeling study on the effect of piston bowl geometries in a gasoline/biodiesel fueled RCCI engine at high speed, *Energy Conversion and Management*, 112, 2016, 359-368.
- [19] Wang, Z., Chen, Y., He, C., Wang, D., Nie, Y., Li, J. 2025. Effect of Improved Combustion Chamber Design and Biodiesel Blending on the Performance and Emissions of a Diesel Engine. *Energies*, 18(11), 2956.
- [20] Khan, S., Panua, R., Bose, P. K. 2019. The impact of combustion chamber configuration on combustion and emissions of a single cylinder diesel engine fuelled with soybean methyl ester blends with diesel. *Renewable Energy*, 143, 335-351.
- [21] Jyothi, U. S., Reddy, K. V. K. 2022. HAD analysis on particle diameter in hydrogen-enriched diesel engine for different piston bowl geometries. *International Journal of Ambient Energy*, 43(1), 1661-1670.
- [22] Yize, L., Bo, W., Wenyu, G., Jiayong, W., Changzhen, L. 2025. Influence of combustion chamber pit depth on the combustion process and emissions in diesel engines. *International Journal of Ambient Energy*, 46(1), 2507148.
- [23] Doppalapudi, A.T., Azad, A.K., Khan, M.M.K., Oo, A.M.T. 2025. Effect of different chamber geometries on combustion formation to reduce harmful emissions. *Applied Thermal Engineering*, 261, 125073.